

Лекция 4. Потери в фотоэлектрических преобразователях

Оптические и рекомбинационные потери

Основные необратимые потери энергии в ФЭП связаны с:

- отражением солнечного излучения от поверхности преобразователя,
- затенение контактной сеткой;
- прохождением части излучения через ФЭП без поглощения в нём,
- рассеянием на тепловых колебаниях решётки избыточной энергии фотонов,
- рекомбинацией образовавшихся фотопар на поверхностях и в объёме ФЭП,
- внутренним сопротивлением преобразователя,
- и некоторыми другими физическими процессами.

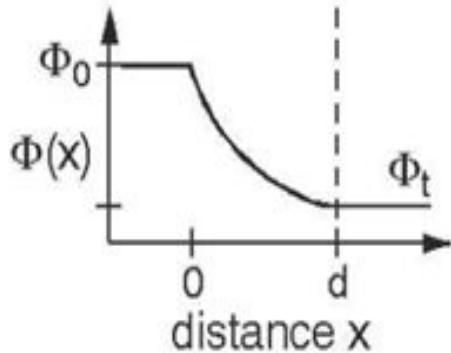
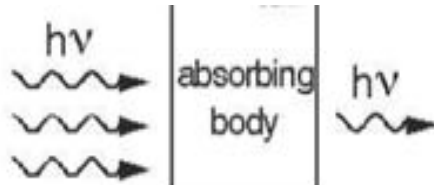
Меры по уменьшению всех видов потерь энергии в ФЭП:

1. Просветляющие покрытия в виде тонких пленок. R уменьшается от $>35\%$ для непросветленной поверхности до 10% (однослойные покрытия);
2. Создание текстурированной фронтальной поверхности;
3. Использование полупроводников с оптимальной для солнечного излучения шириной запрещённой зоны;
4. Направленное улучшение свойств полупроводниковой структуры путём её оптимального легирования и создания встроенных электрических полей;
5. Переход от гомогенных к гетерогенным и варизонным полупроводниковым структурам;
6. Оптимизация конструктивных параметров ФЭП (глубины залегания p-n-перехода, толщины базового слоя, частоты контактной сетки и др.);
7. Применение многофункциональных оптических покрытий, обеспечивающих просветление, терморегулирование и защиту ФЭП от космической радиации;
8. Разработка ФЭП, прозрачных в длинноволновой области солнечного спектра за краем основной полосы поглощения;
9. Создание каскадных ФЭП из специально подобранных по ширине запрещённой зоны полупроводников, позволяющих преобразовывать в каждом каскаде излучение, прошедшее через предыдущий каскад, и пр.
10. Создание преобразователей с двухсторонней чувствительностью (до $+80\%$ к уже имеющемуся КПД одной стороны);
11. Применения люминесцентно переизлучающих структур;
12. Предварительное разложение солнечного спектра на две или более спектральные области с помощью многослойных плёночных светоделителей (дихроичных зеркал) с последующим преобразованием каждого участка спектра отдельным ФЭП

Поглощение электромагнитного излучения

Закон Бугера-Ламберта-Бера:

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-ax)$$



Интенсивность излучения на расстоянии x

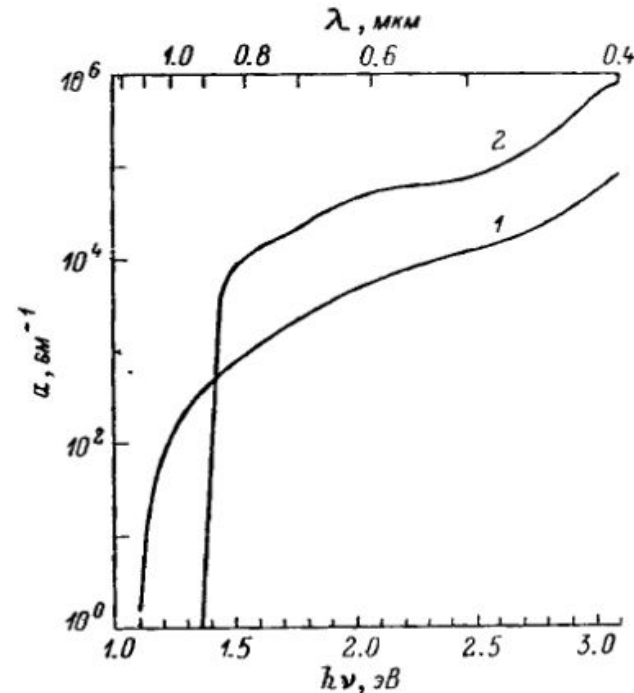
Интенсивность входящего пучка

$a^{-1} = l_a$ – длина поглощения

«Прямые» и «непрямые» полупроводники отличаются не только вероятностью поглощения излучения с $h\nu \geq E_g$.

Малое время жизни

Светодиоды и лазеры на GaAs и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

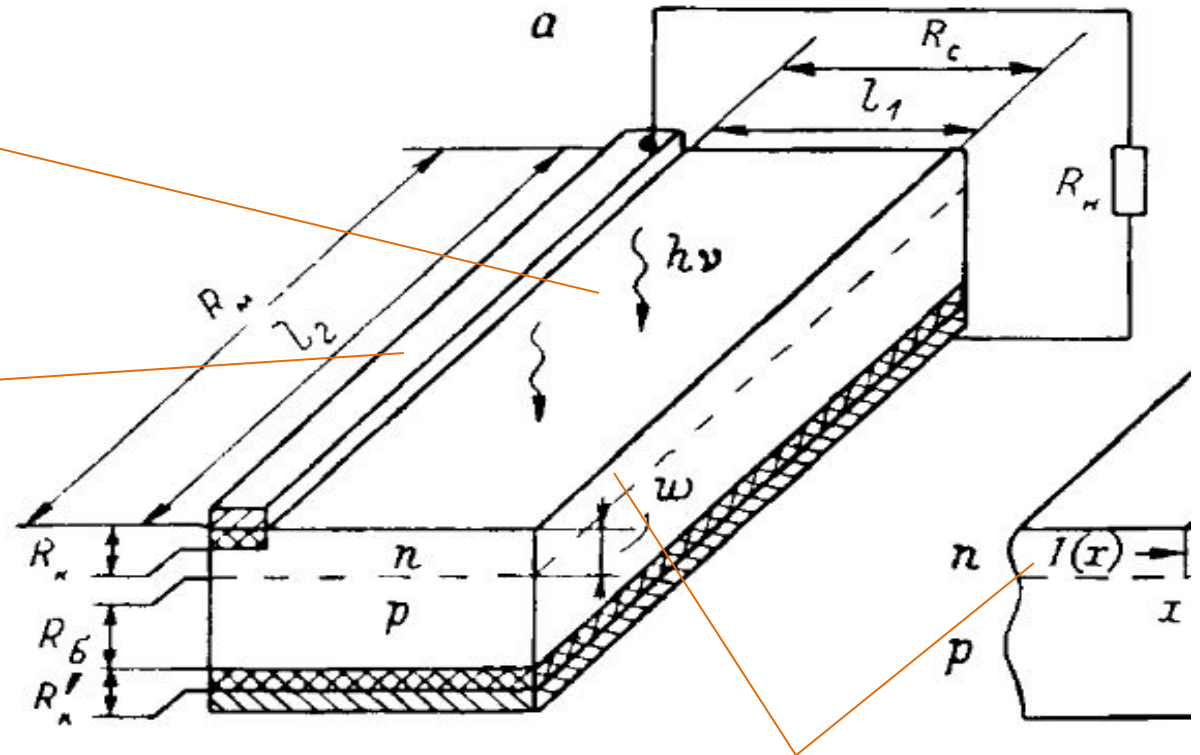


Спектральная зависимость показателя поглощения для кремния (1) и арсенида галлия (2), $T=300\text{ K}$

Модель СЭ с последовательным сопротивлением

Прямоугольная полупроводниковая пластина с планарным pn -переходом

Полосковый контакт длиной l_2



толщина n -области – w

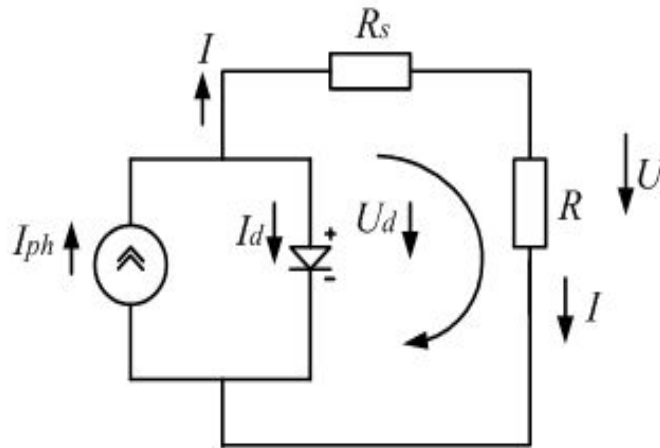
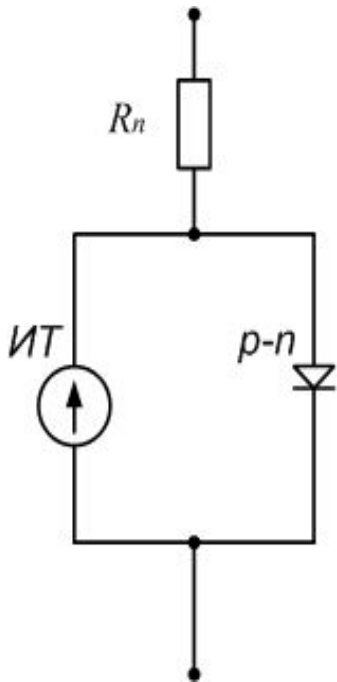
Факторы, влияющие на последовательное сопротивление:

- Слоеое сопротивление $R_l = \frac{\rho L_{\perp}}{w L_{\parallel}}$ где $L_{\perp}$ $L_{\parallel}$ - размеры СЭ
- Сопротивление контактов

Обычно $w \ll L_{\parallel}$, $L_{\perp} \ll L_{\parallel}$

Пренебрежем контактными сопротивлениями, продольным сопротивлением металлической полоски и сопротивлением базы (p -области),

Схема замещения освещенного СЭ с последовательным сопротивлением R_s



$$I = I_{ph} - I_d$$

$$= I_{ph} - I_0(e^{\beta u_d} - 1)$$

$$\beta \equiv \frac{q}{nkT}$$

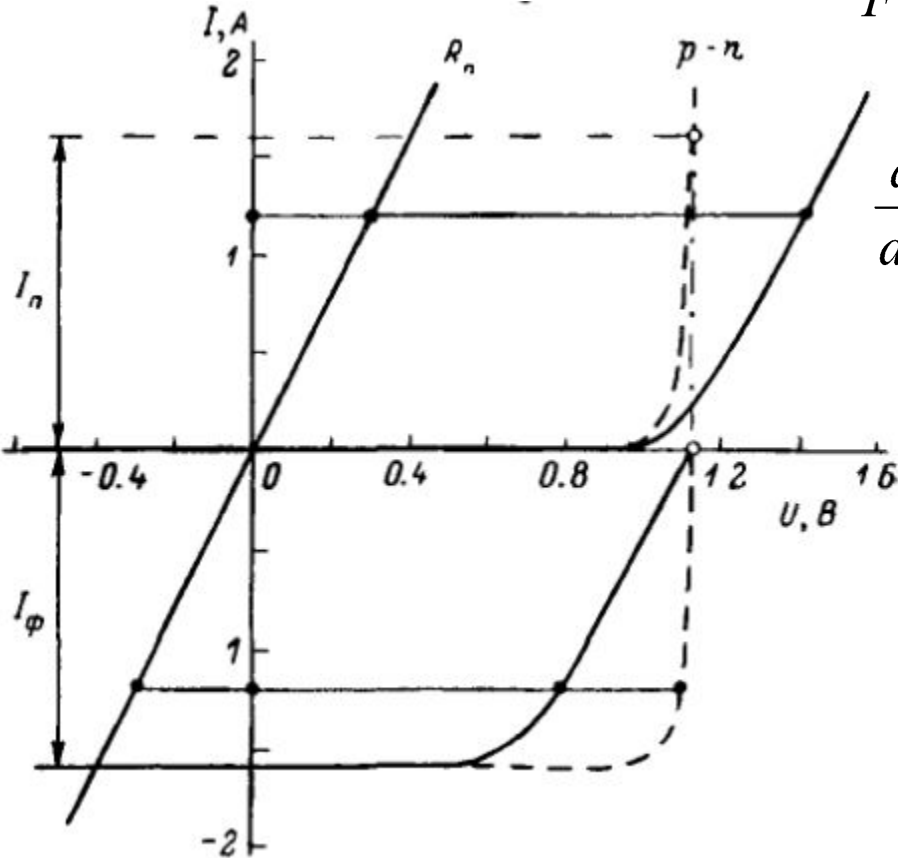
$$-u_d + IR_s + U = 0$$

$$I = I_{ph} - I_0(e^{\beta(U + IR_s)} - 1)$$

Напряжение холостого хода освещенного СЭ с омическими потерями

$$U_{xx} = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \approx \frac{1}{\beta} \ln \frac{I_{ph}}{I_0}$$

Определение последовательного сопротивления по экспериментальной ВАХ



$$F(U, I) = I - I_{ph} + I_0 [\exp(\beta(U + IR_l)) - 1] = 0$$

$$\left. \frac{dI}{dU} \right|_{I=0} = - \frac{\partial F / \partial U}{\partial F / \partial I} \bigg|_{I=0} = - \frac{I_0 \beta \exp(\beta U)}{1 + I_0 \beta R_l \exp(\beta U)}$$

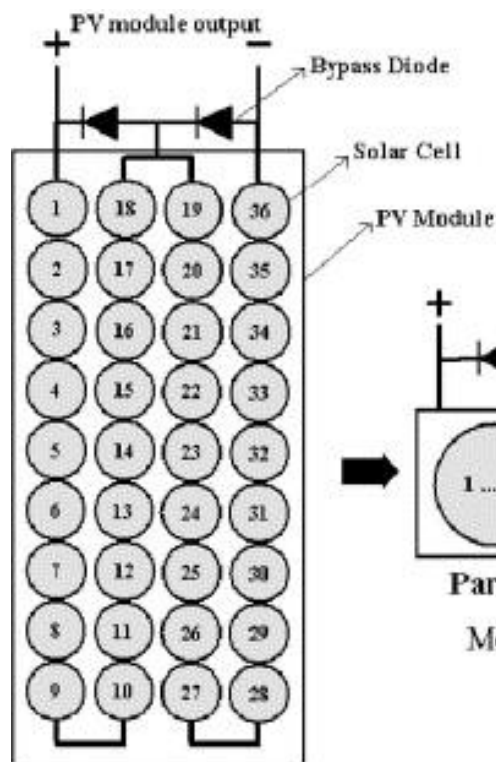
$$\frac{I_0}{R_l} \beta$$

$$I_0 \beta R_l \exp(\beta U)$$

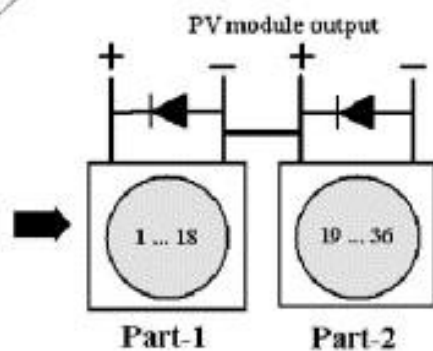
$$\left. \frac{dI}{dU} \right|_{I=0} \approx - \frac{1}{R_l}$$

Темновая ВАХ и ВАХ при освещении для СЭ с последовательным сопротивлением

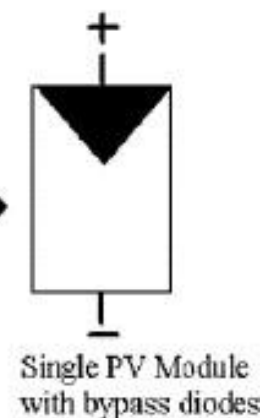
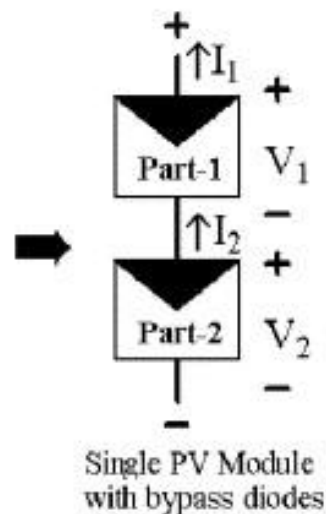
Модель СЭ с распределенными омическими потерями



Solar Cell Based Model



Module Based Model

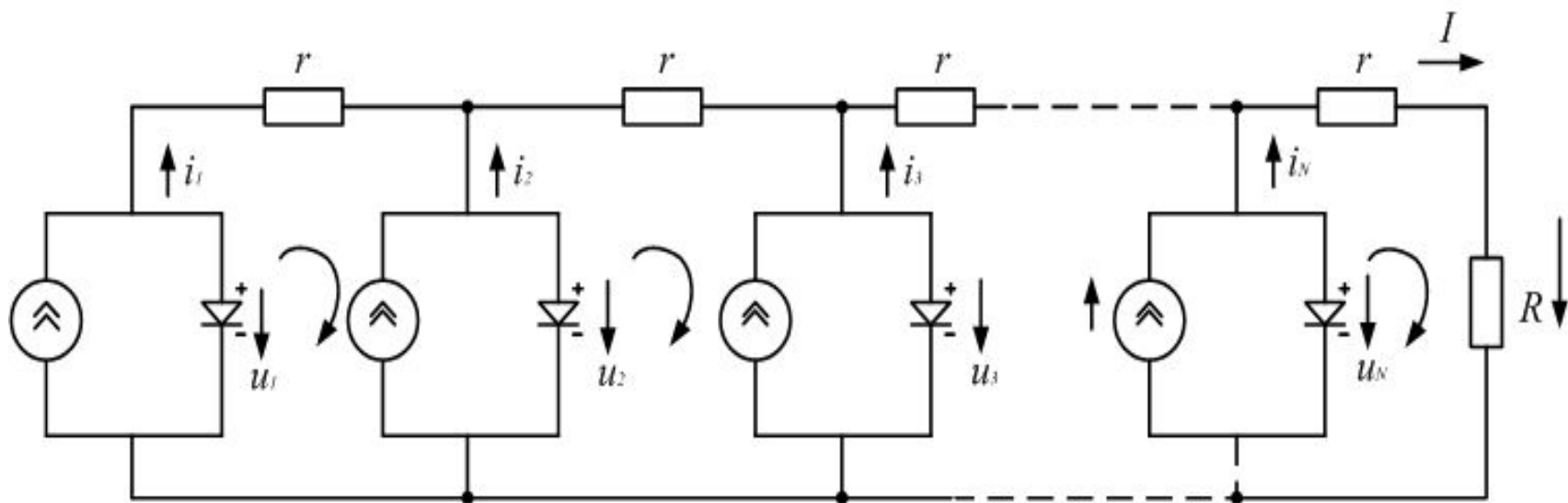


Пренебрежем

- контактными сопротивлениями,
- продольным сопротивлением металлической полоски и
- сопротивлением базы (p -области).

Сопротивление фронтального слоя считаем
распределенным

Многозвенная схема замещения СЭ
с последовательными сопротивлениями потерь



Система уравнений
Кирхгофа:

$$u_2 = u_1 - r i_1,$$

$$u_3 = u_2 - r(i_1 + i_2),$$

$$u_4 = u_3 - r(i_1 + i_2 + i_3),$$

.....

$$u_N = u_{N-1} - r(i_1 + i_2 + \dots + i_{N-1}),$$

$$U = u_N - rI,$$

$$I = \sum_{k=1}^N i_k$$

Токи через частичные pn -

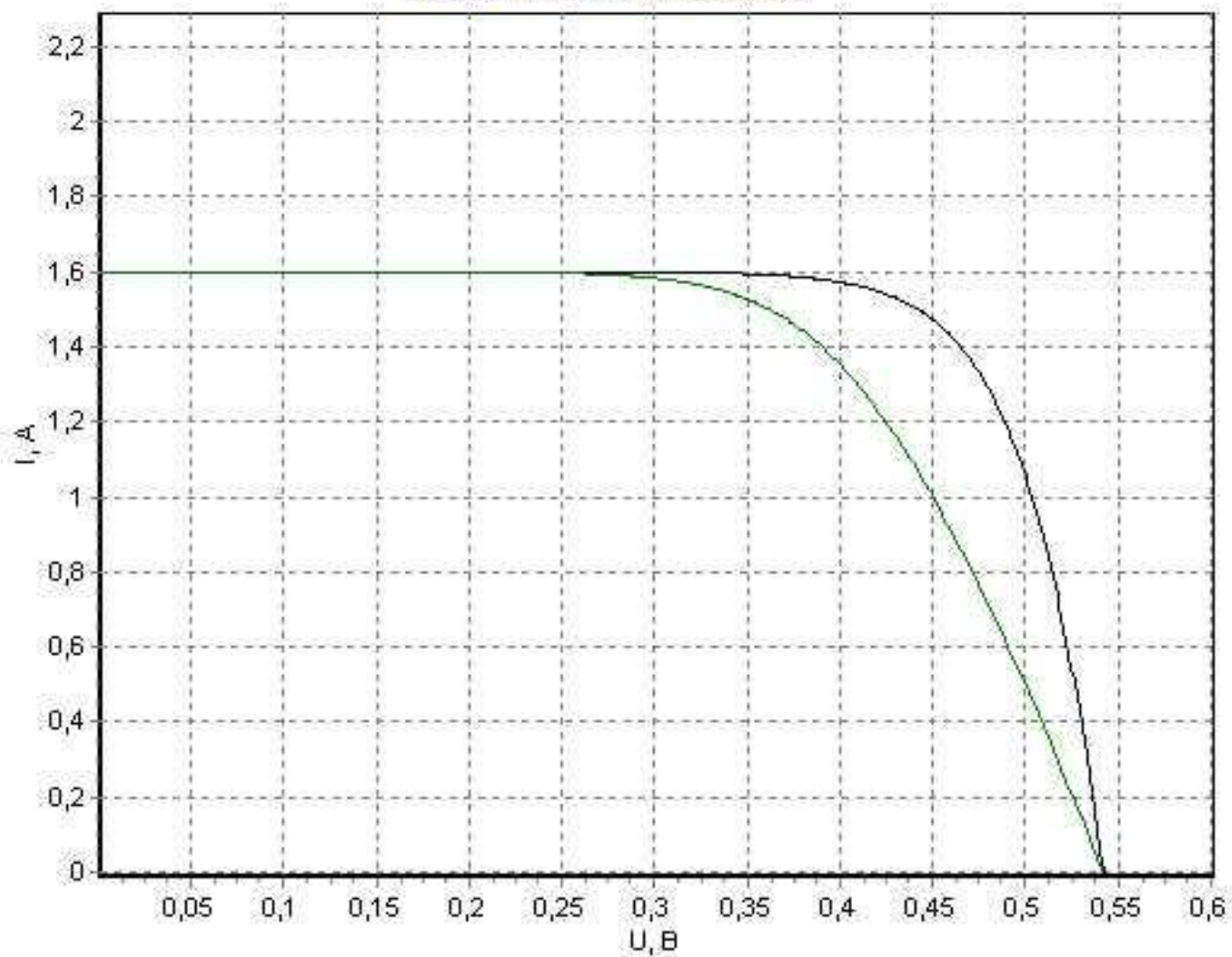
переходы:

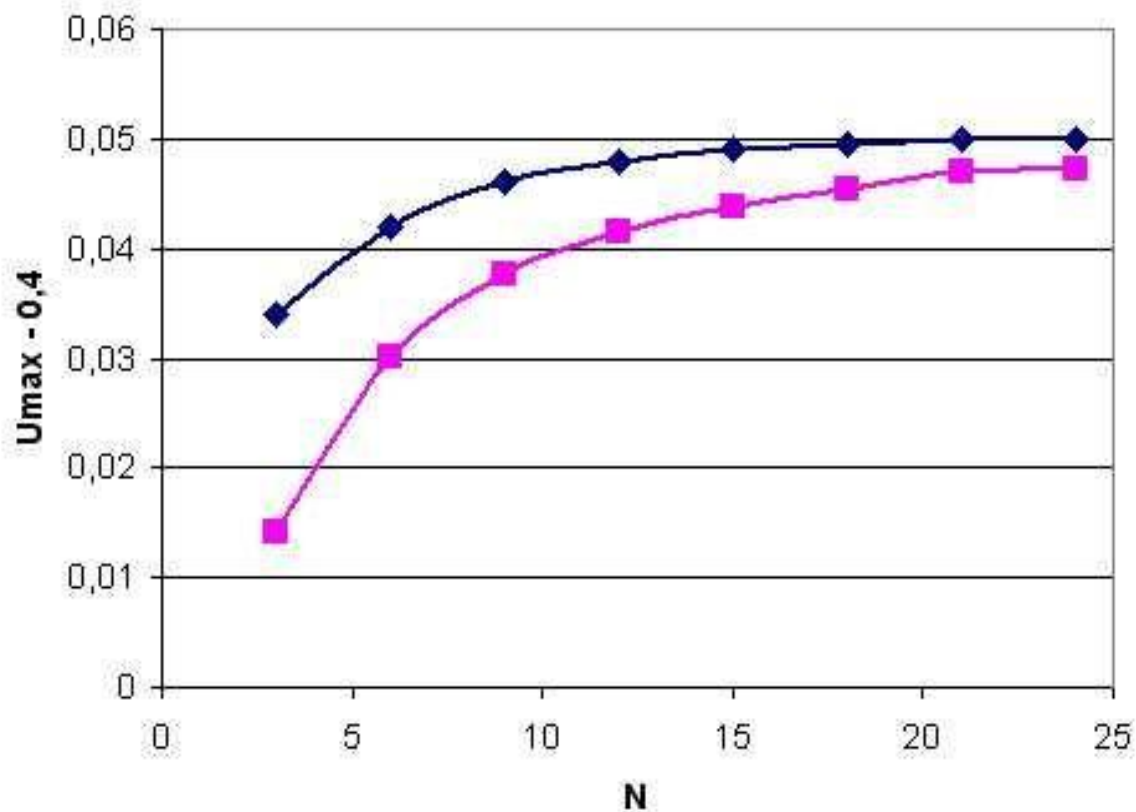
$$i_{ph} = I_{ph} / N \quad i_0 = I_0 / N$$

$$i_k = i_{ph} - i_0 [\exp(\beta u_k) - 1] \quad k = 1, \dots, N$$

ВАХ многозвенной схемы замещения (черный)
и однодиодной схемы (зеленый)

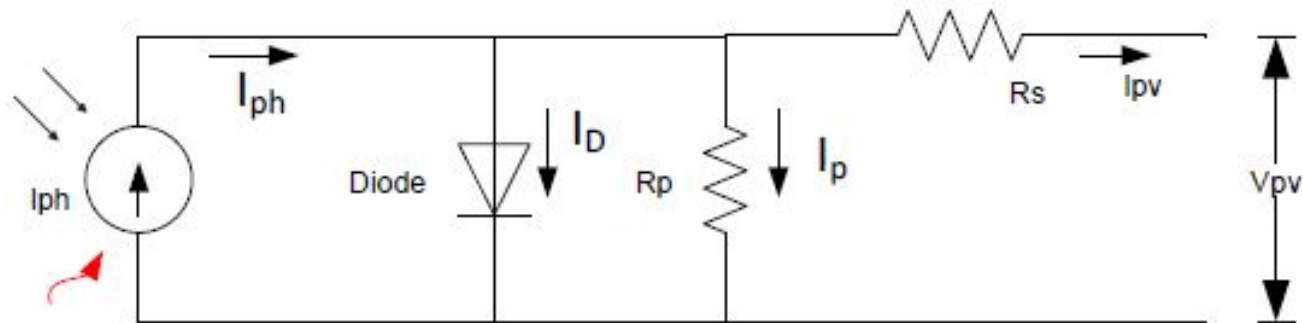
I_{ph}
 I_0
 β
 R_l





Зависимость положения точки максимальной мощности от числа участков N при $I_{ph} = 1.6 \text{ A}$, $I_0 = 10^{-7} \text{ A}$, $\beta = 30.6 \text{ B}^{-1}$: черная $R_i = 0.03 \text{ Ом}$; красная $R_i = 0.06 \text{ Ом}$

Модель СЭ с последовательным и параллельным сопротивлениями



ВАХ:
$$I = I_{\Phi} - I_0 \left(e^{\beta(U + IR_s)} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p}$$

$$F = I - I_{\Phi} + I_0 \left(e^{\beta(U + IR_s)} - 1 \right) + \frac{U + IR_s}{R_p} = 0$$

Дифференциальная проводимость:

$$\frac{\partial I}{\partial U} = - \frac{\partial F / \partial U}{\partial F / \partial I} = - \frac{I_0 \beta e^{\beta(U + IR_s)} + 1/R_p}{I_0 \beta R_s e^{\beta(U + IR_s)} + 1 + R_s/R_p}$$

Режим короткого замыкания

Режим холостого хода

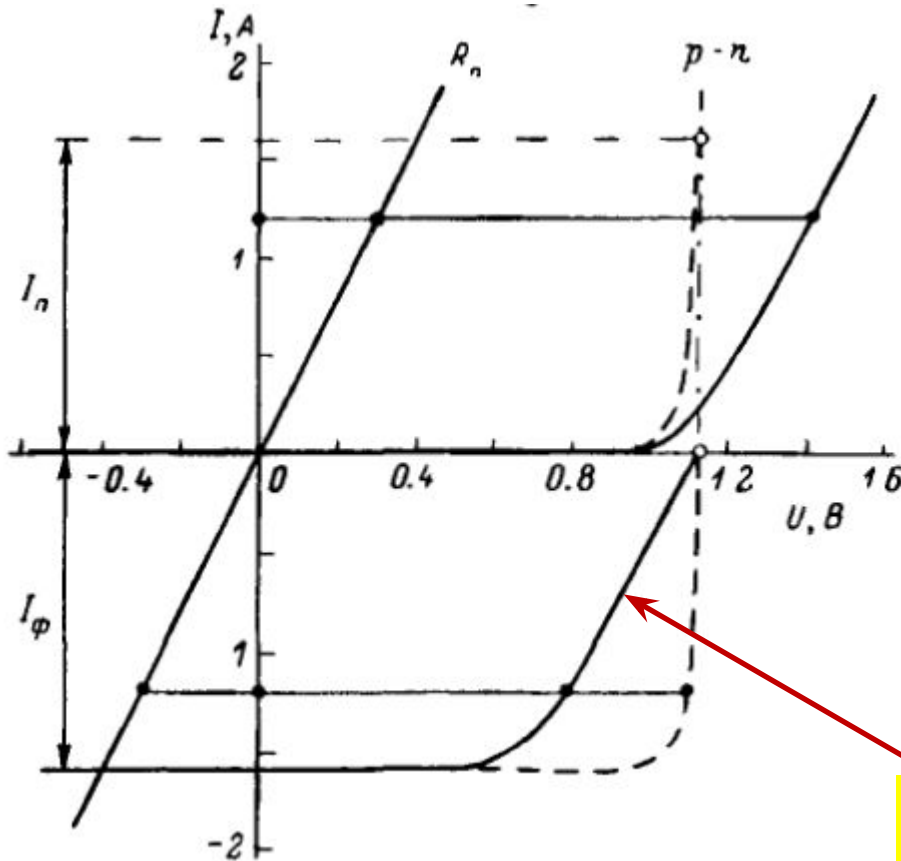
$$I = 0 \quad U = U_{\text{хх}}$$

$$e^{\beta(U+IR_s)} = e^{\beta U_{\text{хх}}} \gg 1$$

$$I_0 \beta R_s \exp(\beta U)$$

$$R_s / R_p \ll 1$$

$$\frac{\partial I}{\partial U} \Big|_{I=0} \approx -\frac{1}{R_s}$$



Способ определения
последовательного сопротивления по
экспериментальной ВАХ

Темновая ВАХ и ВАХ при освещении для СЭ
с последовательным сопротивлением

Режим короткого замыкания

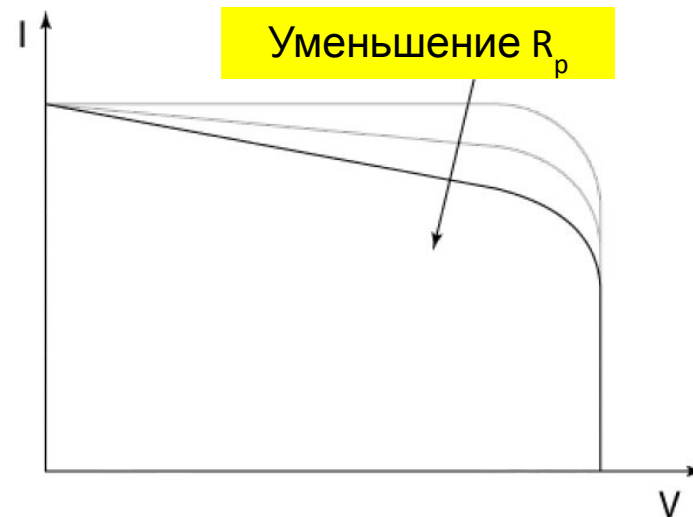
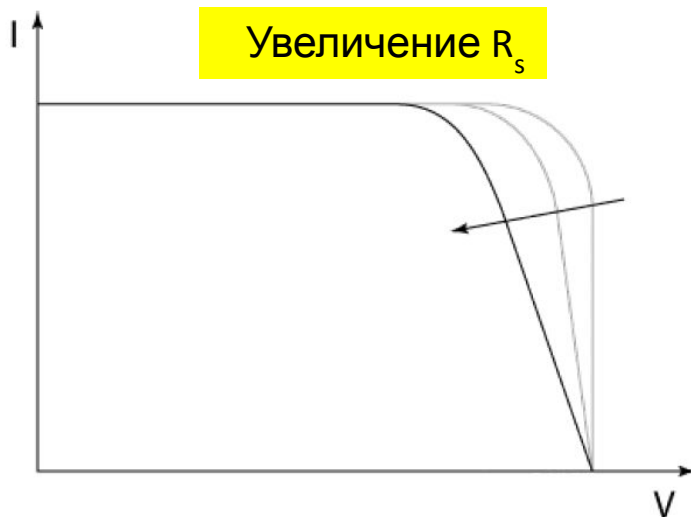
$$U = 0 \quad I = I_{\text{кз}}$$

$$I_0 \beta R_s \ll 1$$

$$e^{\beta(U+IR_s)} = e^{\beta I_{\text{кз}} R_s} \sim 1$$

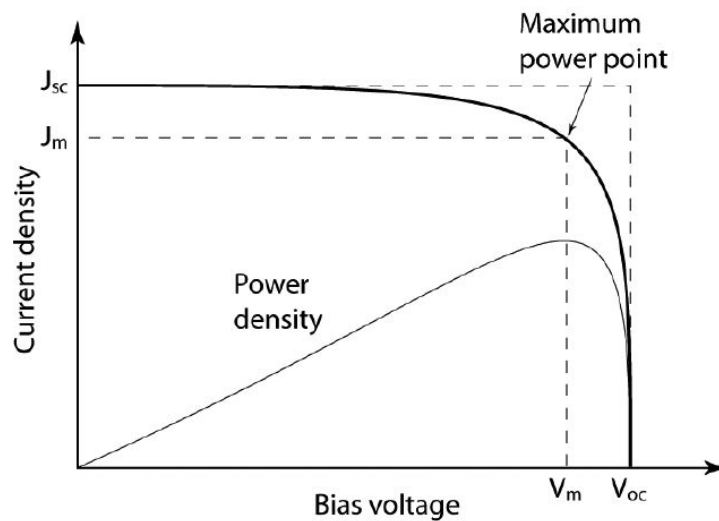
$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial U} \Big|_{U=0} &= - \frac{1/R_s \left(I_0 \beta R_s e^{\beta I_{\text{кз}} R_s} + R_s/R_p \right)}{I_0 \beta R_s e^{\beta I_{\text{кз}} R_s} + 1 + R_s/R_p} \approx - \frac{1/R_s \left(I_0 \beta R_s e^{\beta(U+IR_s)} + R_s/R_p \right)}{1 + R_s/R_p} \\ &\approx - \frac{1/R_s \left(R_s/R_p \right)}{1 + R_s/R_p} \approx - \frac{1}{R_p} \end{aligned}$$

Способ определения параллельного сопротивления по экспериментальной ВАХ



Эффективность ФЯ

$$\frac{d(I(U)U)}{dU} = 0$$



Зависимость эффективности ФЯ от ширины ЗЗ для видимого солнечного спектра

